

**Новохат Олег, Грицюк Галина**  
**МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ПЕРЛІТУ РАДІАЦІЙНИМ СПОСОБОМ**

**Анотація**

*У статті наведено спрощене математичне описання процесу сушіння та нагрівання перліту радіаційним способом. Також описано два основних способи термообробки перліту під час його вспучування. Відмічено вплив способів термообробки на такі фізичні властивості перліту як водопоглинання, міцність та щільність. Встановлено основний промисловий спосіб підведення теплоти. Висловлено припущення про доцільність застосування інфрачервоного випромінювання для нагрівання та сушіння перліту. Також автором наведена фізична модель та основні припущення. Для математичного описання встановлені початкові та граничні умови. Наведено рекомендації щодо рішення математичної моделі. У висновках також наведено технічні рекомендації щодо інтенсифікації процесу нагрівання та сушіння перліту радіаційним способом. Автором наведено межі застосування даного математичного описання та рекомендації щодо його вдосконалення.*

**Ключові слова:** перліт, сушіння, радіаційний спосіб, інфрачервоне випромінювання, моделювання, математична модель.

**Novokhat Oleh, Hrytsiuk Halyna**  
**MODELING OF THE PERLITE DRYING PROCESS BY RADIATION METHOD**

**Annotation**

*The article presents a simplified mathematical description of the process of drying and heating of perlite by radiation method. There are also two main methods of heat treatment of perlite during its swelling. The influence of heat treatment methods on such physical properties of perlite as water absorption, strength and density is noted. The main industrial method of heat supply has been installed. It has been suggested that it is advisable to use infrared radiation to heat and dry perlite. The author also provides a physical model and basic assumptions. The initial and boundary conditions are set for mathematical description. The recommendations for the solution of the mathematical model are given. The conclusions also provide technical guidance on the intensification of the heating and drying of perlite by radiation. The author presents the limits of application of this mathematical description and recommendations for its improvement.*

**Keywords:** perlite, drying, radiation method, infrared radiation, modeling, mathematical model.

**1. Постановка проблеми**

Перліт – горна порода вулканічного походження, що широко застосовується в будівництві, металургії, сільському господарстві, харчовій промисловості тощо. Особливо поширена його вспучена форма, що досягається завдяки його розширенню під час високотемпературного нагрівання.

Технологія виробництва вспученого перліту включає термообробку в одну або дві стадії.

За одностадійної термообробки перліт випаюється в печах за температури 1000-1200°C. Для вспучування перліту у вигляді піску (розміри частинок до 5 мм) застосовуються шахтні печі та печі з киплячим шаром, а для випалу щебню (фракції більше 5 мм) – барабанні печі.

Під час двостадійної обробки перед випалом перліт піддається підсушуванню та нагріванню в барабанних сушарках або в сушарках з киплячим шаром до температури 200-400°C. При цьому досягається контроль вологості перліту перед його подальшим випалом.

Вспучений перліт, утворений шляхом одностадійної термообробки, має відкрито-пористу структуру. Це зумовлює його високе водопоглинання та щільність, проте малу міцність [1, с. 29]. Структура вспученого перліту за двостадійної термообробки здебільшого закрито-пориста, що зумовлює обернені характеристики.

Отже, для термообробки перліту використовується конвективний спосіб сушіння та нагрівання. Проте в багатьох галузях виробництва широко застосовується радіаційний спосіб з використанням інфрачервоного випромінювання, що має здатність проникати в об'єм матеріалу [2, с. 311], зокрема й в зернистий сипучий матеріал [3, с. 21]. Його перевагами є екологічність, висока інтенсивність процесу, можливість локального застосування тощо. Але відсутність кінетичних закономірностей сушіння та нагрівання перліту інфрачервоним випромінюванням, описання математичної моделі не дає змоги оцінити перспективність цього способу під час виробництва вспученого перліту.

**2. Виклад основного матеріалу дослідження**

Математичне описання процесу дає змогу задаючись вихідними параметрами процесу та необхідними кінцевими показниками розрахувати тривалість процесу та кількість затраченої теплоти.

Процес термообробки перліту радіаційним способом є задачею нестационарного теплообміну. Він полягає в нагріванні перліту з частковим видаленням вологи шляхом випаровування, тобто сушінням. В основі математичного описання нестационарного нагрівання та сушіння матеріалу лежать рівняння зміни його вологовмісту та температури в часі [4, с. 16].

В науковій літературі наявно достатньо математичних моделей процесів нагрівання та сушіння різнотипних матеріалів. Більшість з цих моделей базуються на основних рівняннях нестационарного тепло- та масообміну, описаних, зокрема, Ликовим А.В. [5, с. 267].

Згідно фізичної моделі дрібнозернистий перліт розташований на безкінечній площині. Площина має тверду поверхню та є хімічно інертною до перліту. Розміри його частинок впливають лише на порозність шару і, відповідно, на масу квадратного метру насипаного перліту. Між частинками існує контакт, що дозволяє теплоті передаватись завдяки теплопровідності матеріалу. Також теплота передається через здатність інфрачервоного випромінювання поглинатись матеріалом. Над верхньою поверхнею перліту розташований інфрачервоний випромінювач (нагрівник), що є джерелом теплоти. Простір між ним та перлітом заповнений газом, в ролі якого виступає вологе повітря. Поглинена частинками перліту теплота витрачається на випаровування вологи в матеріалі та збільшення ступеня його нагрятості. Теплота відводиться з верхньої поверхні перліту тепловіддачею до вологого повітря та при дотиканні до нижньої площини.

Для адаптації цих рівнянь для спрощеного математичного описання сушіння та нагрівання перліту інфрачервоним випромінювання взято такі основні припущення:

- 1) перліт розташований у вигляді рівномірного шару, поверхні якого перпендикулярні вектору дії інфрачервоного випромінювання;
- 2) оскільки над перлітом знаходиться повітря з водяною парою, то можна стверджувати, що система є двофазною;
- 3) порозність шару перліту достатня для того, щоб дифузія утвореного всередині нього пари не лімітувала процес її відведення із зони сушіння;
- 4) Нижня поверхня, що контактує з перлітом, має ідеальний з ним контакт.

Для описання теплового потоку від інфрачервоних випромінювачів до поверхні шару перліту через шар повітря з водяною парою використано закон Стефана-Больцмана. Проходження теплоти через шар перліту описується за законом Бугера згідно системи рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial \tau} = a_{\text{eff}}(T) \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{q_r(T_{z=0})}{c_p \text{ eff}(T) \rho_{\text{eff}}(T)} K e^{-Kz} - \frac{\rho_p(T)r}{\rho_{\text{eff}}(T)c_p \text{ eff}(T)} \frac{du}{d\tau}; \\ q_r(T_{z=0}) = \varepsilon_{pr}(K_{a-v})\sigma(T_{\text{IR}}^4 - T_{z=0}^4); \\ \frac{du}{d\tau} = \frac{\beta}{g} [p_s(T_{z=0}^+) - p_p(T_{z=0}^-)] + k(u - u_m), \end{cases} \quad (1)$$

де  $T$  – абсолютна температура, К;

$\tau$  – час, с;

$a_{\text{eff}}$  – ефективна температуропровідність перліту, м<sup>2</sup>/с;

$q_r$  – вектор густини радіаційного теплового потоку, Вт/м<sup>2</sup>;

$T_{\text{IR}}, T_{z=0}$  – абсолютна температура поверхонь інфрачервоного нагрівника та перліту, м;

$c_p \text{ eff}(T)$  – температурна залежність масової ізобарної теплоємності вологого перліту, Дж/(кг·К);

$\rho_{\text{eff}}(T), \rho_p(T)$  – температурна залежність густини вологого та абсолютно сухого перліту, кг/м<sup>3</sup>;

$K, K_{a-v}$  – коефіцієнт поглинання інфрачервоного випромінювання вологим перлітом та вологим повітрям, м<sup>-1</sup>;

$z$  – товщина шару перліту, м;

$r$  – масова теплота випаровування води, Дж/кг;

$u, u_m$  – середній відносний вологовміст в поточний момент часу і відносний рівноважний у шарі перліту, кг/кг.

$\varepsilon_{pr}$  – приведений ступінь чорноти поверхонь інфрачервоного нагрівника та шару перліту, в якому враховується також поглинання шару вологого повітря;

$\sigma$  – стала Стефана-Больцмана, Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>);

$T_{\text{IR}}, T_{z=0}$  – абсолютна температура поверхонь інфрачервоного нагрівника та перліту, К;

$\beta$  – коефіцієнт вологообміну, с/м;

$g$  – маса квадратного метру сухого перліту, кг/м<sup>2</sup>;

$p_s, p_p$  – тиск насичення пари на поверхні шару перліту та парціальний тиск водяної пари в прилеглому шарі вологого повітря, Па;

$k$  – константа сушіння, с<sup>-1</sup>.

Де

$$\varepsilon_{pr}(K_{a-v}) = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_{\text{IR}}} + \left( \frac{1}{\varepsilon_{z=0}} - 1 + \frac{3K_{a-v}\delta_{\text{air}}}{4} \right) \frac{F_{\text{IR}}}{F_f}}, \quad (2)$$

де  $\varepsilon_{\text{IR}}, \varepsilon_{z=0}$  – ступінь чорноти випромінювальної поверхні ІЧ нагрівника та поверхні перліту;

$F_{\text{IR}}, F_f$  – площа поверхонь нагрівника та перліту, м<sup>2</sup>;

$\delta_{\text{air}}$  – товщина шару вологого повітря, м.

Всі ефективні значення системи волога-перліт визначається за правилом адитивності:

$$x_{\text{eff}} = x_p(1 - w) + x_w w \quad (3)$$

де  $x_{\text{eff}}$  – шукане ефективне значення;

$x_p$  – значення для абсолютно сухого перліту;

$x_w$  – значення для вологи (води);

$w$  – вологість.

Початкові умови для (1) за  $\tau = 0$ :

$$T = T(z), \quad 0 \leq z \leq \delta_p, \quad (4)$$

де  $\delta_p$  – товщина шару вологого перліту, м.

Граничні умови для (1) за  $\tau > 0$ :

1) на непрозорій границі інфрачервоного нагрівника розглядаються граничні умови першого роду

$$T_{IR} = T(W), \quad (5)$$

де  $W$  – залежність зміни електричної потужності радіаційного нагрівника від часу, Вт;

2) на верхній границі шару перліту задано граничні умови третього роду

$$n \cdot (-\lambda_{\text{eff}}(T) \nabla T)|_{z=0} = \alpha_1 (T - T_{s1}); \quad (6)$$

3) на нижній границі шару перліту задано граничні умови четвертого роду (за умови розташування шару перліту на твердій основі)

$$n \cdot (-\lambda_{\text{eff}}(T) \nabla T)|_{z=\delta_f} = n \cdot (-\lambda_{\text{ст}}(T) \nabla T)|_{z_{\text{ст}}=0}, \quad (7)$$

де «ст» відноситься до стінки (безкінечної площини згідно фізичної моделі), на якій лежить шар перліту.

Наведене математичне описання процесу нагрівання та сушіння перліту можна розв'язати, наприклад, методом скінченних різниць або граничних елементів [6, с. 39].

### 3. Висновки

Очевидно, що недоліком вище наведеного математичного описання є відсутність врахування дифузійних процесів вологи всередині шару перліту. Тому доцільно вдосконалити дану модель шляхом наведення рівнянь: що описують дифузійні потоки всередині шару перліту. Крім того, для більшої відповідності можна зображати шар перліту не як рівномірний з заданою порозністю, а як набір дрібних частинок, що оточені вологим повітрям.

З математичного описання очевидно, що процес можна інтенсифікувати завдяки зменшенню товщини шару перліту та збільшенню густини теплового потоку. Останнє можна реалізувати завдяки збільшенню потужності інфрачервоних випромінювачів або додатковим підведенням гарячого газоподібного теплоносія. Також інтенсифікація видалення утвореної водяної пари з товщі шару та над його поверхнею шляхом продування призведе до інтенсифікації сушіння в цілому. Також для цього доцільно виконувати перемішування шару перліту.

Також необхідно зазначити, що дана модель придатна лише для опису тепло- та масообмінних процесів під час сушіння й нагрівання перліту за температур до 400°C, коли не відбуваються деструкційні процеси (наприклад, вспучування перліту).

### Список використаних джерел та літератури

- [1] Алексеева Л. Особенности предварительной термоподготовки перлитового сырья различных месторождений для производства вспученного перлита с улучшенными показателям. / Л. Алексеева // Строительные материалы и изделия. – 2013. – №3. – с. 26-29.
- [2] Marchevsky V. Paper drying process for corrugation (fluting) using radiant energy / V. Marchevsky, O. Novokhat, O. Tsepkalo // Ukrainian Journal of Food Science. – 2015. – №2. – P. 310-321.
- [3] Marchevsky V. Analysis of the research results of the zeolite drying process / V. Marchevsky, O. Novokhat, A. Margarian // Technology audit and production reserves. – 2019. – №1/3 (45). – P. 21-23.
- [4] Karvatskii, A. Numerical modelling of physical fields in the process of drying of paper for corrugating by the infrared radiation / A. Karvatskii, V. Marchevsky, O. Novokhat // Eastern-European journal of enterprise technologies. – 2017. – №2/5 (86). – P. 14-22.
- [5] Теория сушки: учебное пособие. – 2-е изд., перераб. и доп. // А.В. Лыков. – М.: Энергия, 1968. – 472 с.
- [6] Лелека С.В. Застосування методу граничних елементів для розв'язання тривимірних задач теплопровідності. / С.В. Лелека, А.Я. Карвацкий, П.Й. Дудніков // Наукові вісті НТУУ “КПІ”. – №4. – с. 39-46.

### References

- [1] Alekseeva L. Osobennosti predvaritel'noy termopodgotovki perlitovogo syrya razlichnykh mestorozhdeniy dlya proizvodstva vspuchennogo perlita s uluchshennymi pokazatelyam. / L. Alekseeva // Stroitelnye materialy i izdeliya. – 2013. – №3. – s. 26-29.
- [2] Marchevsky V. Paper drying process for corrugation (fluting) using radiant energy / V. Marchevsky, O. Novokhat, O. Tsepkalo // Ukrainian Journal of Food Science. – 2015. – №2. – P. 310-321.
- [3] Marchevsky V. Analysis of the research results of the zeolite drying process / V. Marchevsky, O. Novokhat, A. Margarian // Technology audit and production reserves. – 2019. – №1/3 (45). – P. 21-23.
- [4] Karvatskii, A. Numerical modelling of physical fields in the process of drying of paper for corrugating by the infrared radiation / A. Karvatskii, V. Marchevsky, O. Novokhat // Eastern-European journal of enterprise technologies. – 2017. – №2/5 (86). – P. 14-22.
- [5] Teoriya sushki: uchebnoe posobie. – 2-e izd., pererab. i dop. // A.V. Lykov. – M.: Energiya, 1968. – 472 s.

[6] Leleka S.V. Zastosuvannia metodu hranychnykh elementiv dlia rozviazannia tryvymirnykh zadach teploprovodnosti. / S.V. Leleka, A.Ia. Karvatskyi, P.I. Dudnikov // Naukovi visti NTUU "KPI". – №4. – s. 39-46.

**Novokhat Oleh**, Candidate of Engineering Sciences, Senior Lecturer, Department of Machines and Apparatus of Chemical and Oil Refinery Productions, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», 37, Peremohy Ave., Kyiv, Ukraine, 03056, *e-mail*: novokhatoleh@gmail.com. *Where and when he graduated*: National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», 2008. *Professional orientation or specialization*: mass- and heat-transfer processes, paper industry equipment. *The most relevant publication outputs*: 1. Karvatskii, A. Numerical modelling of physical fields in the process of drying of paper for corrugating by the infrared radiation / A. Karvatskii, V. Marchevsky, O Novokhat // Eastern-European journal of enterprise technologies. – 2017. – № 2/5 (86). – P. 14-22, 2. Marchevsky V. Paper drying process for corrugation (fluting) using radiant energy / V. Marchevsky, O. Novokhat, O. Tsepkalo // Ukrainian Journal of Food Science. – 2015. – №2. – P. 310-321, 3. Marchevsky V. Analysis of the research results of the zeolite drying process / V. Marchevsky, O. Novokhat, A. Margarian // Technology audit and production reserves. – 2019. – №1/3 (45). – P. 21-23.

**Hrytsiuk Halyna**, graduate (student), Department of Machines and Apparatus of Chemical and Oil Refinery Productions, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», 37, Peremohy Ave., Kyiv, Ukraine, 03056, *e-mail*: galiahritsiuk@ukr.net.